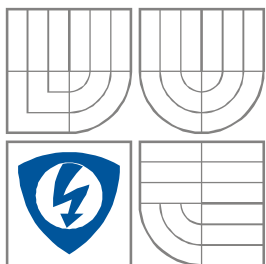


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NABÍJEČ PB AKUMULÁTORŮ S AUTOMATICKÝM CYKLEM

LEAD-ACID BATTERY CHARGER WITH AUTOMATIC CYCLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Pavel Moravec
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. Miloslav Steinbauer Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO, 2013

ABSTRAKT

Olověné akumulátory jsou i v 21. století stále významným a hojně využívaným typem akumulátorů. Tato práce se proto věnuje návrhu inteligentního nabíječe, který zajistí jejich rychlé, ale šetrné nabití s ohledem na maximální životnost a spolehlivost. Navržený systém využívá metody nabíjení konstantním proudem i konstantním napětím. Lze jej použít k nabíjení klasických, gelových i trakčních akumulátorů s pracovním napětím 12 V. Dokáže šetrně nabíjet hluboce vybité akumulátory, ale i udržovat jejich maximální kapacitu při delší odstávce. Nabíječ je schopen rozeznat míru vybití akumulátoru a podle ní automaticky zvolit nejvhodnější nabíjecí proces. Jednotlivé nabíjecí fáze jsou interpretovány pomocí světelné signalizace a dosažitelný nabíjecí proud činí 20 A.

KLÍČOVÁ SLOVA

olověný akumulátor, nabíjení konstantním proudem, nabíjení konstantním napětím, spínaný zdroj, dvojčinný propustný měnič

ABSTRACT

The lead-acid batteries are still important and very often used type of battery even in 21st century. This project is focused on development of charger, which provides fast, but save charging of batteries with respect to maximum life time and reliability. The developed system uses constant current charging and constant voltage charging methods. It's specialized in charging batteries with liquid or gel electrolyte and traction types of batteries, which works with 12 V value of voltage. It's able to charge safely the deeply discharged batteries and when battery is unplugged for a long time, it can keep its capacity at maximum level too. The charger can choose optimal charging process according to the discharged level of battery. Each charging phase is interpreted by light signals and the achievable charging current is 20 A.

KEYWORDS

lead acid battery, constant current charging, constant voltage charging, switching power source, push-pull forward converter

MORAVEC, P. *Nabíječ Pb akumulátorů s automatickým cyklem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 40 s., 3 s. příloh. Semestrální práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Miloslav Steinbauer, PhD.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma Nabíječ Pb akumulátorů s automatickým cyklem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Miloslavu Steinbauerovi, Phd. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Obsah	v
Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
1 Teoretický úvod	1
1.1 Olověný akumulátor	1
1.1.1 Konstrukce	1
1.1.2 Elektrochemické reakce	2
1.1.3 Typy olověných akumulátorů	2
1.1.4 Nabíjení a vybíjení	3
1.2 Propustný měnič	5
1.2.1 Princip	5
1.2.2 Dvojčinný propustný měnič (push - pull)	6
2 Návrh Nabíječe	8
2.1 Kontrolní část	8
2.1.1 Obvod UC2906	8
2.1.2 Schéma a výpočet součástek	10
2.2 Budicí část	13
2.2.1 Obvod TL494	13
2.2.2 Schéma a výpočet součástek	14
2.3 Výkonová a napájecí část	15
2.3.1 Schéma a popis funkce výkonové části	15
2.3.2 Schéma a popis funkce napájecí části	17
2.3.3 Výpočet transformátorů a výstupního filtru	18
3 Konstrukce	22
3.1 Plošné spoje	22
3.2 Skříňka	23
3.3 Chlazení	24
4 Měření a důležité průběhy	25
4.1 Účinnost	25

4.2	Průběhy napětí a proudů	25
5	Závěr	27
	Použitá literatura	28
	Seznam příloh	29
A	Celkové schéma zapojení	30
B	Desky plošných spojů	31
C	Seznam použitých součástek	32

SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. 1.1: Typická konstrukce olověného akumulátoru	2
obr. 1.2: Nabíjení metodou konstantního proudu	4
obr. 1.3: Nabíjení metodou konstantního napětí s omezením dobíjecího proudu	5
obr. 1.4: Propustný měnič s demagnetizačním vinutím.....	6
obr. 1.5: Dvojčinný propustný měnič (push - pull).....	7
obr. 2.1: Vnitřní blokové zapojení obvodu UC2906	8
obr. 2.2: Průběhy nabíjecího napětí a proudu při jednotlivých fázích.....	9
obr. 2.3: Schéma zapojení kontrolní části.....	10
obr. 2.4: Vnitřní blokové zapojení obvodu TL494	13
obr. 2.5: Schéma zapojení budicí části	14
obr. 2.6: Zapojení obvodu napájející primární vinutí hlavního transformátoru TR1	16
obr. 2.7: Zapojení obvodu na sekundární straně hlavního transformátoru TR1	17
obr. 2.8: Schéma napájecí části.....	18
obr. 3.1: Schéma zapojení signalizační desky	22
obr. 3.2: Skříňka a umístění všech částí nabíječe (pohled shora)	23
obr. 3.3: Přední panel nabíječe.....	24
obr. 3.4: Zadní panel nabíječe.....	24
obr. 4.1: Průběhy proudu na tlumivce L1	26
obr. 4.2: Průběhy napětí na C-E tranzistoru T1	26

SEZNAM TABULEK

tab. 3.1: Zapojení vývodů konektoru JP5 k vývodům konektorů na hlavní desce	23
tab. 3.2: Hodnoty rezistorů voliče maximálních nabíjecích proudů	24
tab. 4.1: Dosažená účinnost	25

1 TEORETICKÝ ÚVOD

Olověný akumulátor je v současnosti jedním z nejpoužívanějších sekundárních zdrojů. Díky kvalitně zvládnutým a léty ověřeným metodám výroby se dosahuje nízké výrobní ceny, vysoké spolehlivosti, značných výkonů a kapacit. Pro své zajímavé vlastnosti se používají především jako zdroje pro startování spalovacích motorů v automobilech i motocyklech, dále v záložních zdrojích UPS nebo bezpečnostních systémech a také jako zdroje pro trakční stroje, kterými mohou být například vysokozdvizné vozíky, golfová vozítka, robotické podavače materiálů ve výrobních závodech a další.

Energie uložená v těchto akumulátorech bohužel není nekonečná a je ji potřeba dodávat pomocí nabíječů založených na lineární nebo spínané technologii. Vhodnost jejich použití závisí především na velikosti proudů, kterými je akumulátor nabíjen.

1.1 Olověný akumulátor

Je jedním z několika typů akumulátorů, které svou elektrickou energii získávají z elektrochemických reakcí různých sloučenin. Vyrábějí se v kapacitách pohybujících se řádově od 1 Ah do 10 kAh.

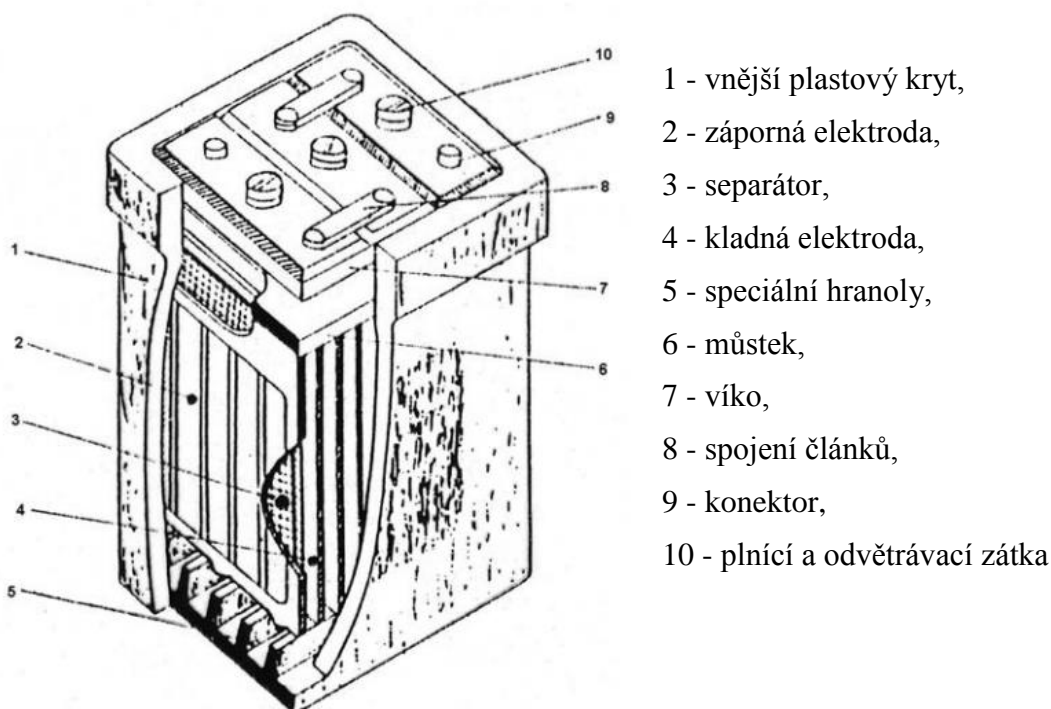
1.1.1 Konstrukce

Každý výrobce využívá jiné tvary mřížek, separátorů a jejich umístěním se snaží o co největší životnost, o co největší snížení vnitřního odporu a samovolného vybíjení, ke kterému dochází při delší odstávce akumulátoru. Základní princip konstrukce je ale u všech stejný.

Materiály použité k výrobě olověných akumulátorů musí být odolné vůči dlouhodobému působení kyseliny sírové, která je obsažena v elektrolytu. Jedním z těchto materiálů je olovo nebo jeho slitiny. Proto jsou všechny součásti vedoucí elektrický proud vyrobeny právě z tohoto prvku.

Uvnitř akumulátoru se nacházejí jednotlivé články, které spolu bývají propojeny do série olověnými můstkami a propojkami, aby se dosáhlo požadované velikosti napětí. Tyto články jsou tvořeny protilehlými olověnými mřížkami, představující elektrody. Kladná elektroda je vyrobena z oxidu olovičitého (PbO_2) a záporná z pórovitého olova (Pb) připomínající strukturu houby. Ty jsou vzájemně odděleny separátory, mezi nimiž je elektrolyt tvořený roztokem kyseliny sírové (H_2SO_4) a destilované vody (H_2O). Separátory jsou pro elektrolyt propustné. Mřížky se na spodu opírají o speciální hranoly, které svým tvarem vytvářejí prostor pro kaly odpadávající z olověných elektrod.

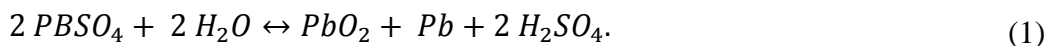
Vnější obal akumulátoru je většinou tvořen plastovým blokem, v jehož vrchní části se nacházejí plnicí a odvětrávací zátky, které slouží k doplňování elektrolytu nebo k úniku plynů vzniklých samovybíjením či přebíjením. Dále se zde nacházejí konektory kladného a záporného pólu, případně indikátor stavu baterie. Celkovou konstrukci znázorňuje obr. 1.1



obr. 1.1: Typická konstrukce olověného akumulátoru (převzato z [1])

1.1.2 Elektrochemické reakce

Chemický proces probíhající v akumulátoru je dán touto rovnicí (1) převzaté z [1]



Při nabíjení dochází k separaci složek elektrolytu a to tak, že na kladné elektrodě je vylučován oxid olovičitý (PbO_2), na záporné olovo (Pb) a elektrolyt je tvořen kyselinou sírovou (H_2SO_4).

Při vybíjení je proces opačný a na elektrodách se usazuje síran olovnatý (PbSO_4). Hustota elektrolytu se snižuje a tvoří se voda.

1.1.3 Typy olověných akumulátorů

Za nejobecnější rozdělení lze považovat dělení na akumulátory:

- vyžadující údržbu
- bezúdržbové

Akumulátory vyžadující údržbu patří mezi nejstarší typy olověných akumulátorů. Jejich elektrody jsou zaplaveny tekutým elektrolytem, který je tvořen roztokem kyseliny sírové a vody. Tyto akumulátory poznáme podle horního krytu, na němž jsou umístěny zátky pro kontrolu hladiny elektrolytu. Jejich údržba spočívá právě v kontrole této hladiny, kterou v případě nízké úrovně doplníme destilovanou vodou na úroveň předepsanou. Voda se totiž z akumulátoru postupem času samovolně vypařuje a také dochází k jejímu výparu při nabíjení, kdy probíhá elektrolýza, čili rozklad vody na vodík a kyslík. V současnosti tento typ akumulátorů ustupuje do pozadí, protože je nahrazen

bezúdržbovým typem, který odstraňuje velké množství jeho nevýhod.

U bezúdržbových akumulátorů se využívá několik technologií, které onu bezúdržbovost zajistí. Tyto akumulátory nejsou vybaveny kontrolními zátkami, čili odpadá nutnost kontroly hladiny elektrolytu a jejich konstrukce je navržena tak, aby bylo možné akumulátor naklánět a aby přesto nehrozil únik elektrolytu. Jediná potřebná údržba u tohoto typu je péče o kontakty, čili zabránění jejich koroze a dostatečné nabití.

Poněkud specifitější rozdělení bezúdržbových akumulátorů je podle použité technologie:

- se zaplavenými elektrodami
 - s deskovými elektrodami
 - se spirálovými elektrodami
- s vázaným elektrolytem
 - AGM
 - gelové

U typu se zaplavenými elektrodami je bezúdržbovost dosažena především způsobem výroby mřížkových elektrod, které se legují vápníkem a jejich tvar je buď deskový, nebo spirálovitý. Vápník se příznivým způsobem podílí na snížení vypařování vody, jejíž intenzita tak klesne na nepatrnou úroveň. Správným používáním akumulátoru je po celou dobu jeho životnosti díky zaručeno, že hladina elektrolytu neklesne pod kritickou mez.

U typu AGM (Absorbed Glass Mat) je využito poněkud jiné provedení elektrodových mřížek a separátorů. Je tvořen ze značného počtu elektrod, které jsou od sebe odděleny separátorem vyrobeného ze skelných vláken s dotací bóru. Tento materiál dokáže na sebe výborně vázat elektrolyt. Elektrolyt tedy již nemá kapalně skupenství a díky tomu je zamezeno případnému úniku elektrolytu při náklonu akumulátoru. Tato technologie způsobí zvýšení výkonu a kapacity při snížení hmotnosti a také snížení velikosti samovybíjení oproti dříve zmiňované technologii.

Gelový akumulátor je svou konstrukcí velmi podobný typu se zaplavenými elektrodami. Zjednodušeně řečeno je jediný rozdíl v elektrolytu. Ten je totiž vázán v křemičitém gelu. Opět tedy nehrozí únik elektrolytu při náklonu a je zde dosaženo zvýšení kapacity a výkonu při snížení hmotnosti jako u typu AGM. Navíc takovýto akumulátor může pracovat při vyšších provozních teplotách a můžeme jej hlouběji vybit.

1.1.4 Nabíjení a vybíjení

Na začátek je vhodné zmínit, jaké hodnoty napětí olověný akumulátor při různém stupni vybití dosahuje. Pro šestičláňkové akumulátory se napětí naprázdno při plném nabití pohybuje v rozmezí 12,6 - 12,8 V. Naopak u plně vybitého je toto napětí přibližně 10,5 V. K této hodnotě bychom se ale neměli příliš přibližovat, protože takto hluboké vybití poškozuje akumulátor, dochází k tzv. sulfataci elektrod, která značně zkracuje životnost. Tyto hodnoty měříme za pokojové teploty a až po několika hodinách od posledního použití akumulátoru.

Při procesu vybíjení je z rovnice (1) patrné, že z kyseliny sírové se začne na elektrodách tvořit síran olovnatý a voda. Elektrolyt tím postupně ztrácí na své hustotě.

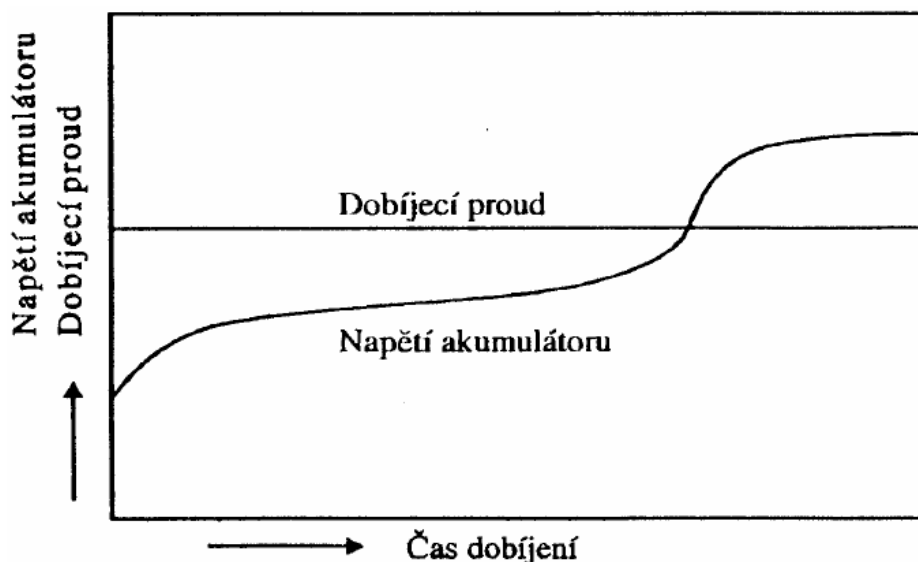
Nabíjení hluboce vybitého akumulátoru by mělo probíhat s ohledem na průběh napětí na jeho svorkách. Nejprve totiž napětí stoupá přibližně na 13,2 V, kdy se na olověných mřížkách elektrod tvoří kyselina sírová. Potom napětí vzroste asi na hodnotu 14,7 V. V té době probíhá přeměna síranu olovnatého. Po překročení této napěťové úrovně dojde k rozkladu vody na její základní prvky. Tento stav se projevuje tím, že bublinky kyslíku a vodíku stoupají elektrolytem vzhůru a následně z akumulátoru unikají do okolí. Napětí na svorkách se zvýší na 16,3 V až 16,6 V. Od tohoto okamžiku se již napětí nezvyšuje a veškerá dodávaná energie se spotřebovává pouze k rozkladu vody.

Pro proces nabíjení využíváme metod nabíjení konstantním proudem, konstantním napětím s omezením maximálního proudu, případně kombinaci obou těchto metod.

Nabíjení konstantním proudem je metoda, při níž se nemění hodnota dodávaného proudu během celého procesu nabíjení. Velikost tohoto proudu se určí z kapacity nabíjeného akumulátoru podle vztahu (2)

$$I[A] = \frac{C [Ah^{-1}]}{10}. \quad (2)$$

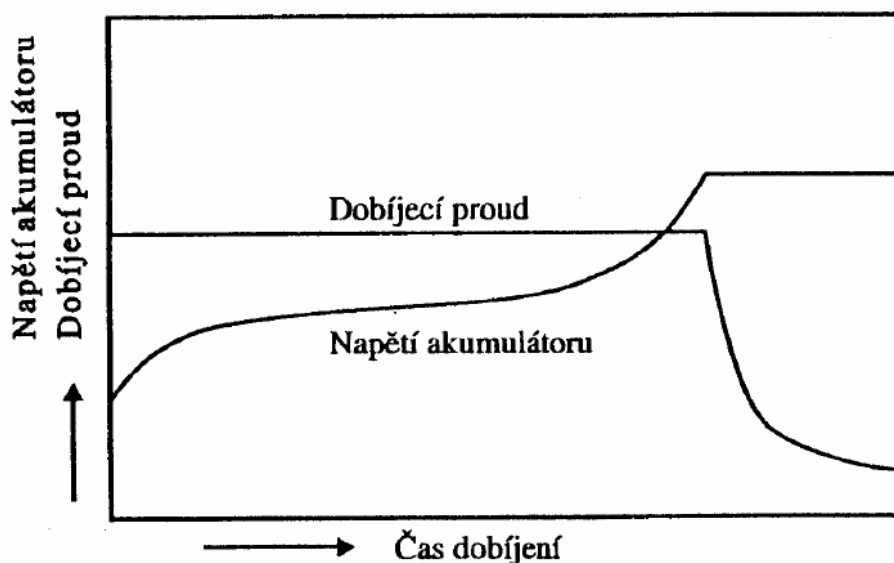
Nabíjíme-li hluboce vybitý akumulátor tímto proudem, jeho plné kapacity dosáhneme po 10 hodinách. Úskalím této metody je fakt, že většinou nikdy přesně neznáme míru vybití akumulátoru, čili nedokážeme přesně odhadnout, jak dlouhý čas bude potřeba k dosažení plné kapacity. Hrozí tedy stav přebíjení a tím degradace elektrolytu díky vypařování vody. Průběh dodávaného proudu a svorkového napětí ilustruje obr. 1.2. Nabíječky pracující s touto metodou musí být vybaveny snímačem napětí a potřebnou automatikou, která nabíjení ve správný okamžik přeruší.



obr. 1.2: Nabíjení metodou konstantního proudu (převzato z [1])

Druhý způsob nabíjení je metoda nabíjení konstantním napětím s omezením dodávaného proudu. U akumulátorů v cyklickém režimu se na svorky přivede napětí 14,7 V, které je během celého nabíjení neměnné. Pro akumulátory pracující ve stand-by

režimu se toto napětí volí nižší, asi 13,6 V. Díky nízkému vnitřnímu odporu olověných akumulátorů by počáteční nabíjecí proud vzrostl na tak vysokou úroveň, že by akumulátor zničil. Proto se zde používá proudový omezovač, který maximální dodávaný proud omezí přibližně na 1 násobek jmenovité kapacity nabíjeného akumulátoru. Jak se napětí na svorkách zvyšuje, tento proud klesá, až dosáhne hodnoty 0,01 násobku jmenovité hodnoty kapacity. Ustálí-li se tento proud na této hodnotě po delší čas, považujeme akumulátor za plně nabitý. Z principu nabíjení touto metodou je patrná její největší výhoda. Není potřeba znát úroveň vybití akumulátoru a díky pevně nastavenému napětí nehrozí stav přebíjení. K plnému nabití akumulátoru je potřeba přibližně stejný čas, jako u metody s konstantním proudem, ale po 2 až 3 hodinách, je akumulátor nabit již přibližně na 80% své jmenovité kapacity díky poměrně velkým počátečním nabíjecím proudům. Průběhy svorkového napětí a dobíjecího proudu ilustruje obr. 1.3.



obr. 1.3: Nabíjení metodou konstantního napětí s omezením dobíjecího proudu (převzato z [1])

V současné době se používá i jiných nabíjecích metod, než které zde byly uvedeny. Při jejich bližším zkoumání ale zjistíme, že vycházejí právě z těchto dvou zmíněných postupů.

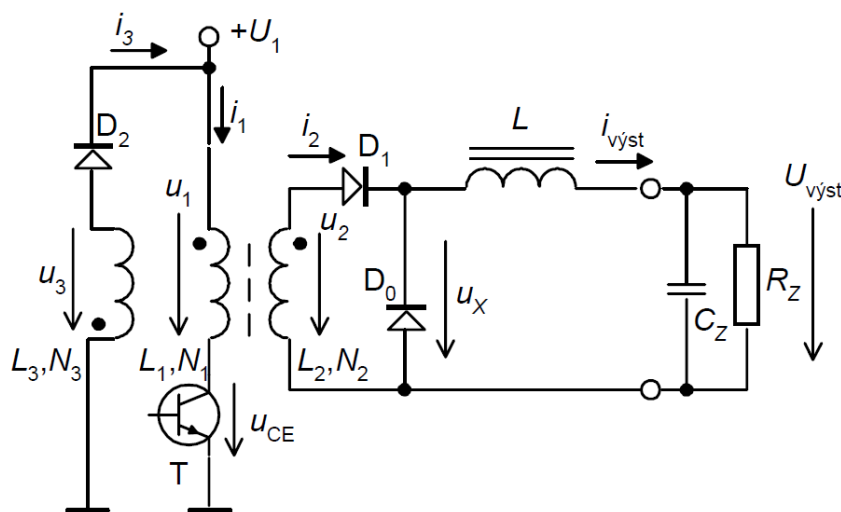
1.2 Propustný měnič

Problematika spínaných zdrojů (měničů) je značně rozsáhlá a proto se zde budeme zabývat pouze jedním typem těchto zdrojů, jehož modifikace bude následně použita v samotném návrhu nabíječe.

1.2.1 Princip

Propustných měničů se používá při požadavku na přenos větších výkonů. Jeho principiální zapojení je na obr. 1.4. Pro přenos energie ze zdroje U_1 do sekundárního obvodu se využívá doby, kdy je tranzistor sepnut. V té době protéká proud I_1 primárním vinutím transformátoru. Ten vybudí proud I_2 na sekundární straně, který dále teče přes

tlumivku L do připojené zátěže. Tento proud $I_{\text{výst}}$ se v průběhu času lineárně zvětšuje a napětí na výstupu $U_{\text{výst}}$ díky tomu také roste. Dioda D_1 je v tomto stavu zapojena v propustném směru.



obr. 1.4: Propustný měnič s demagnetizačním vinutím (převzato z [2])

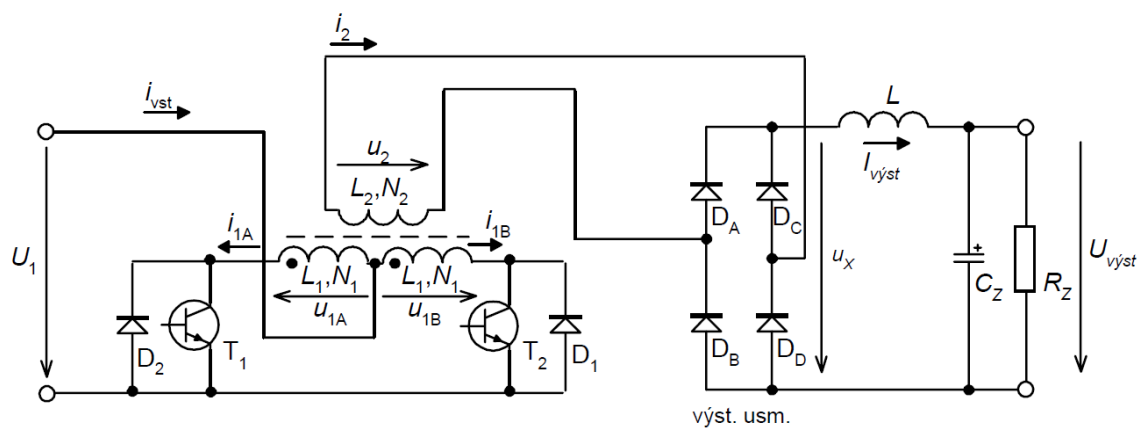
Ve chvíli, kdy výstupní napětí dosáhne určité hodnoty, ovládací obvod tranzistor T uzavře a tím změní napětí na vinutích svou polaritu, aby směr proudu zůstal zachován. Díky tomu se dioda D_1 uzavře a tlumivka L nyní pracuje jako zdroj proudu, který protéká otevřenou diodou D_0 a spotřebovává se v zátěži.

Energie nahromaděná v jádře transformátoru se při rozepnutí tranzistoru T nespotebovává a v případě neošetření tohoto problému by došlo k přesycení jádra. Proto je k primárnímu vinutí navinuto ještě jedno tzv. demagnetizační vinutí, které má stejný počet závitů, ale opačnou orientaci. V něm se vybudí proud I_3 , který přes diodu D_2 zajistí potřebnou demagnetizaci transformátoru.

1.2.2 Dvojčinný propustný měnič (push - pull)

Zapojení tohoto měniče vychází z dvojčinného můstkového zapojení propustného měniče, který je především určen pro velmi vysoké výkony. Jedná se tedy o jeho zjednodušenou verzi, která již nedokáže dodat tak velké výkony, ale pro naši aplikaci je tento výkon naprosto dostatečný. Jeho principiální zapojení popisuje obr. 1.5.

Hlavní odlišností je transformátor se dvěma primárními vinutími, jejichž smysl je navzájem opačný. Pracují tedy v protifázi. Tato vinutí jsou tranzistory T_1 a T_0 střídavě připojována ke zdroji U_1 . Pro správnou činnost měniče je zásadní, aby vazba mezi primárními vinutími byla co nejtěsnější. Přesto je vhodné zapojit ke spínacím tranzistorům diody D_1 a D_2 , které je ochrání před napěťovými špičkami vznikající při jejich vypínání. Velikost výstupního napětí $U_{\text{výst}}$ je opět dána dobou, po kterou jsou tranzistory T_1 a T_0 sepnuty. Jejich střída musí tedy být z principu vždy menší než 50%. Jelikož tranzistory nejsou dokonalými spínači, mohlo by dojít při jejich přepnutí k toku příčného proudu, který by zkratoval vstupní zdroj, což by mohlo způsobit jejich zničení. Proto je potřeba mezi přepnutím tranzistorů zavést určitou prodlevu, která je dána jejich dobou zotavení a v anglicky psané literatuře se jí říká „Dead Time“.



obr. 1.5: Dvojčinný propustný měnič (push - pull) (převzato z [2])

2 NÁVRH NABÍJEČE

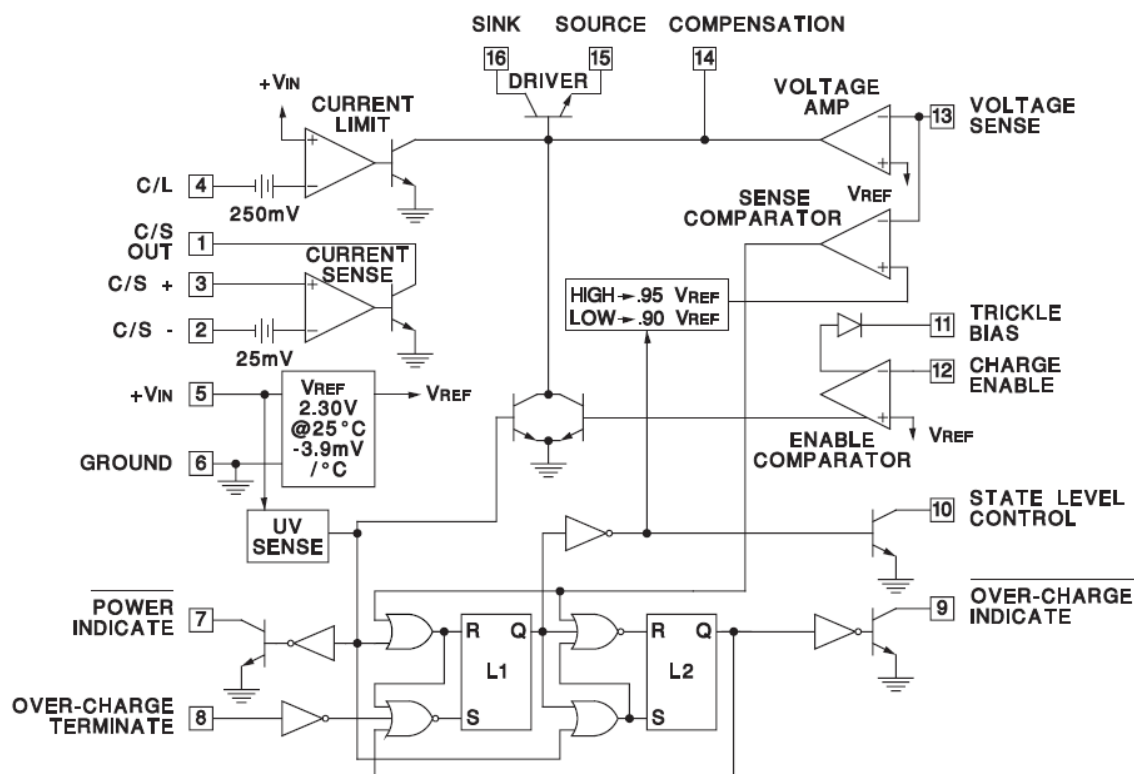
Nabíječ je navržen podle zadání tak, aby byl schopen dodávat nabíjecí proud až 20 A. Vhodnou volbou velikosti tohoto proudu lze nabíjet olověné akumulátory o kapacitách v rozmezí jednotek až stovek Ah. Zapojení je složeno ze třech funkčních částí, jejichž popis bude podrobně rozebrán v následujících kapitolách.

2.1 Kontrolní část

Úlohou kontrolní části nabíječe je řízení nabíjecího procesu. Zodpovídá za to, aby akumulátor byl nabíjen co nejšetrněji za použití nabíjecích metod uvedených v teoretickém úvodu (1.1.4). Také musí zajistit, aby po skončení nabíjecího procesu nedošlo k přebíjení akumulátoru.

2.1.1 Obvod UC2906

Proto byl vybrán a použit integrovaný obvod od firmy Texas Instruments UC2906. Ten v sobě slučuje všechny zmíněné požadavky. Navíc je uzpůsoben i pro nepřetržité připojení k akumulátoru, kdy zabráňuje samovolnému vybíjení. Pro lepší pochopení funkce je na obr. 2.1 uvedeno jeho vnitřní blokové zapojení.

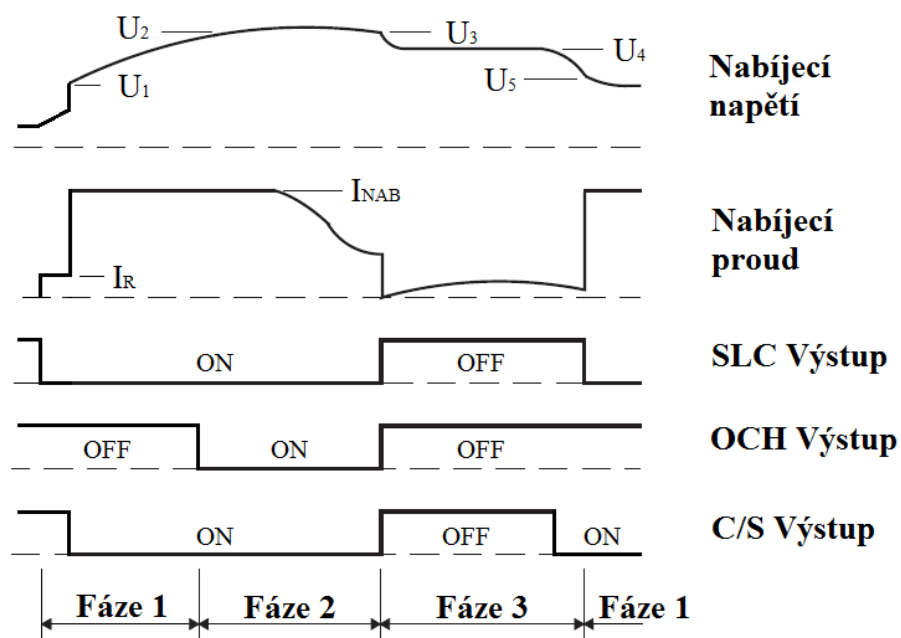


obr. 2.1: Vnitřní blokové zapojení obvodu UC2906 (převzato z [3])

Obvod obsahuje oddělené operační zesilovače, které snímají napětí a proud tekoucí do nabíjeného akumulátoru. Na základě jejich stavu je vyhodnocována fáze nabíjení a obvod na toto reaguje regulací výstupního proudu a napětí tranzistorem označeným ve

schématu jako DRIVER. Dále obvod obsahuje klopné obvody, které zajišťují signalizaci několika nabíjecích stavů a samotné funkce obvodu. Aby docházelo ke korektnímu vyhodnocení získaných hodnot napětí a proudů, je v obvodu interní napěťová reference 2,3 V, jejíž teplotní charakteristika odpovídá charakteristice olověných akumulátorů. Tím je zajištěno, že hodnoty nabíjecích napětí a proudů budou vždy v souladu s těmi, které vyžaduje nabíjený akumulátor a to za jakékoliv teploty, na kterou je akumulátor konstruován. Jelikož se vychází z předpokladu, že nabíječ i akumulátor budou umístěny v prostředí se stejnou teplotou, je toto řešení velmi výhodné.

Obvod pracuje se třemi fázemi nabíjení, jejichž průběhy napětí a proudů jsou znázorněny na obr. 2.2. V první fázi je akumulátor otestován a v případě, že je hluboce vybit, obvod jej nabíjí malým proudem I_R . Tato část první fáze ale není v samotném nabíjení využita a nabíjení probíhá až od doby, kdy svorkové napětí akumulátoru dosáhne na hodnotu $U_1 = 12$ V, která odpovídá 2 V na článek. V okamžiku, kdy je této hodnoty dosaženo, obvod začne akumulátor nabíjet proudem I_{NAB} až do doby, kdy se na jeho svorkách objeví napětí $U_2 = 14,25$ V. Tento postup je vlastně metodou nabíjení konstantním proudem popsáným v kapitole 1.1.4.



obr. 2.2: Průběhy nabíjecího napětí a proudu při jednotlivých fázích

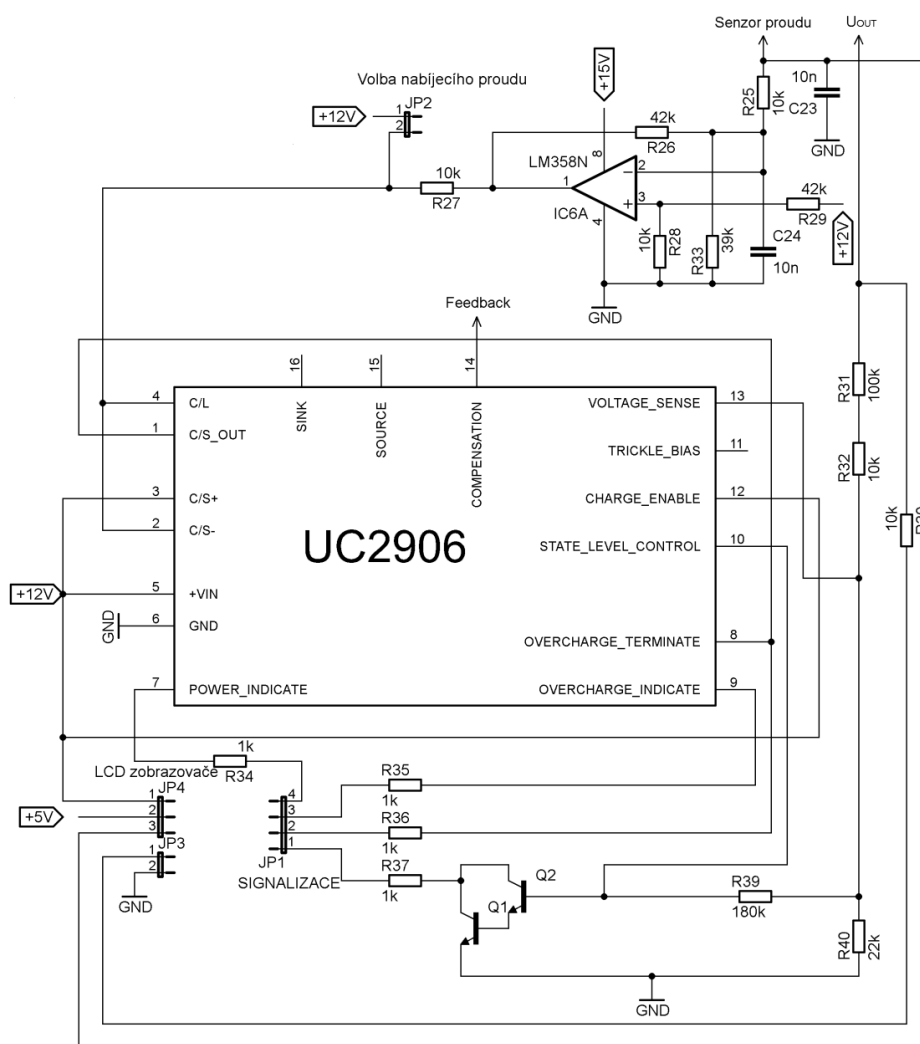
Druhá fáze začíná při dosažení svorkového napětí U_2 . Nyní již akumulátor není nabíjen metodou konstantního proudu, ale metodou konstantního napětí. Hodnota napětí stoupne z U_2 na $U_3 = 15$ V, která odpovídá maximálnímu napětí článku 2,5 V a je udržována na konstantní velikosti po celou dobu této fáze. Díky tomu, že akumulátor se již blíží stavu stoprocentního nabití, klesá postupně jeho nabíjecí proud. Když jeho hodnota poklesne až na hodnotu jedné desetiny maximálního nabíjecího proudu I_{NAB} , je nabíjení ukončeno a obvod přechází do poslední třetí fáze.

Tato fáze je určena pro kompenzaci samovybíjecích procesů. Obvod hlídá hodnotu svorkového napětí akumulátoru. Pokud klesne jeho hodnota na $U_4 = 13,8$ V začne do něj téct takový proud, který udrží svorkové napětí na této úrovni.

Necháme-li nabíječ připojený k akumulátoru a zatížíme-li jej tak, že odebraný proud překročí maximální nabíjecí proud I_{NAB} , klesne postupně svorkové napětí až na úroveň $U_5 = 12,4 \text{ V}$. V tento okamžik se obvod přepne opět do své první nabíjecí fáze.

2.1.2 Schéma a výpočet součástek

Jako základ pro návrh zapojení kontrolní části (obr. 2.3) bylo použito doporučené zapojení výrobce obvodu UC2906. Počáteční nabíjení malým proudem I_r , ke kterému by docházelo při hlubokém vybití akumulátoru, nebude využito. Tuto funkci totiž může zajistit správná volba nabíjecího proudu realizována odporovým děličem na výstupu operačního zesilovače. Dále bylo zapotřebí navrhnout zapojení světelné signalizace a upravit snímání velikosti proudu tekoucího do akumulátoru. Výkonová část, podle katalogu tvořená pouze výkonovým tranzistorem, byla nahrazena spínaným výkonovým měničem, jehož zapojení bude rozebráno v následujících kapitolách.



obr. 2.3: Schéma zapojení kontrolní části

K signalizaci stavů nabíječe slouží 4 diody LED umístěné na předním panelu nabíječe. Ty jsou ve schématu nahrazeny konektorem JP4. Dioda LED připojená k pinu 4 značí připojené napájecí napětí. Znamení, že do akumulátoru teče nabíjecí proud I_{NAB} ,

dává dioda LED na pinu 3. Ta svítí tedy během první a druhé nabíjecí fáze, kdy nabíjecí proud dosahuje vysokých hodnot. Dioda LED na pinu 2 indikuje probíhající druhou fázi nabíjecího procesu. Ve chvíli, kdy je akumulátor plně nabit, čili když nabíječ přejde do třetí udržovací fáze, diody na pinech 2 a 3 zhasnou a rozsvítí se LED na pinu 1. Pro ovládání svitu této LED diody není obvod UC2906 uzpůsoben. K jejímu ovládání tedy posloužil výstup STATE LEVEL. Jelikož přes něj tečou velmi malé proudy, je tato dioda spínána pomocí dvou tranzistorů Q1, Q2 zapojených v Darlingtonově zapojení. Ty jsou spínány právě tímto výstupem zapojeným do báze Q2.

Výpočet rezistorů pro nastavení potřebných nabíjecích napětí je dán rovnicemi (3 až 8), které byly převzaty z katalogových údajů výrobce [3].

Proud I_D tekoucí do vstupů operačních zesilovačů obvodu byl zvolen dle katalogového rozmezí o velikosti 70 μA . Napětí použita k výpočtům jsou uvedena v předchozí kapitole (2.1.1.).

$$R_{40} = \frac{U_{REF}}{I_D} = \frac{2,3}{70 \cdot 10^{-6}} = 32857 \Omega \rightarrow 33 k\Omega \quad (3)$$

$$R_{SUM} = R_{31} + R_{32} + R_{33} = \frac{U_4 - U_{REF}}{I_D} = \frac{13,8 - 2,3}{70 \cdot 10^{-6}} = 164285 \Omega \quad (4)$$

$$R_{38} + R_{39} = \frac{U_{REF} \cdot R_{SUM}}{U_3 - U_4} = \frac{2,3 \cdot 164285}{15 - 13,8} = 314880 \Omega \rightarrow 10 k\Omega + 300 k\Omega \quad (5)$$

$$R_X = \frac{R_{40} \cdot (R_{38} + R_{39})}{R_{40} + R_{38} + R_{39}} = \frac{32857 \cdot 314880}{32857 + 314880} = 29752 \Omega \quad (6)$$

$$R_{31} + R_{32} = (R_{SUM} + R_X) \cdot \left(1 - \frac{U_{REF}}{U_1}\right) = (164285 + 29752) \cdot \left(1 - \frac{2,3}{12}\right) = 156846 \Omega \rightarrow 150 k\Omega + 6,8 k\Omega \quad (7)$$

$$R_{33} = R_{SUM} - R_{31} + R_{32} = 164285 - 156846 = 7439 \Omega \rightarrow 7,5 k\Omega \quad (8)$$

Některé vypočítané rezistory bylo nutné vytvořit sériovou kombinací dvou rezistorů, jejichž hodnoty po sečtení dávají požadovaný odpor (např.: $R_{25} + R_{26} = 150 k\Omega + 6,8 k\Omega$). Bylo to z důvodu použití rezistorů z řady E12, jejichž jednotlivé hodnoty jsou odstupňovány velkým krokem a příliš velké odchylky od vypočítaných hodnot by způsobovaly nezanedbatelné odchylky od žádaných napěťových úrovní.

Zapojení operačního zesilovače LM358 zajišťuje řídicímu obvodu UC2906 potřebné průběhy napětí pro řízení proudu dodávaného akumulátoru při nabíjení. Jedná se o modifikaci diferenčního zesilovače, který připíná napětí vycházející z proudového senzoru k referenčnímu napětí 12 V. Ke správnému vyhodnocování odebíraného proudu

je potřeba, aby se napětí na vstupu C/S obvodu UC2906 měnilo v rozmezí pouze 11,75 V až 12,00 V. Napětí na proudovém senzoru se řídí převodem 60 mV / 1 A s offsetem 0,6 V, takže v našem případě nabývá hodnot 660 mV až 1800 mV. Hodnoty rezistorů R_{25} , R_{26} a R_{28} , R_{29} jsou proto navrženy v takovém poměru, aby se na výstupu objevilo napětí o požadovaném rozsahu, které odvodíme podle následujícího postupu. Prvním předpokladem je, že dělicí poměry rezistorů na vstupech se sobě rovnají (9)

$$\frac{R_{25}}{R_{26}} = \frac{R_{28}}{R_{29}}. \quad (9)$$

Napětí na vstupech operačního zesilovače $U_{IN\pm}$ je tedy dáno vztahem (10)

$$U_{IN\pm} = \frac{U_2 \cdot R_{28}}{R_{28} + R_{29}}, \quad (10)$$

kde napětí $U_2 = 12V$. Proud tekoucí rezistorem R_{25} zjistíme dle rovnice (11)

$$I = \frac{U_1 - U_{IN\pm}}{R_{25}}, \quad (11)$$

v němž napětí, že $U_1 = 60$ až 1200 mV. Napětí na zpětnovazebním rezistoru R_{26} odpovídá rovnici (12)

$$U_{R26} = I \cdot R_{26}, \quad (12)$$

předpokládáme-li, že do neinvertujícího vstupu operačního zesilovače neteče žádný proud. Výstupní napětí U_{OUT} zjistíme z rovnice (13)

$$U_{OUT} = U_{IN\pm} - U_{26}. \quad (13)$$

dosadíme-li do rovnice (13) a upravíme ji, obdržíme vztah (14)

$$U_{OUT} = U_2 - U_1 \cdot \frac{R_{28}}{R_{29}}. \quad (14)$$

Nyní z rovnice vyjádříme dělicí poměr (15)

$$\frac{R_{28}}{R_{29}} = \frac{U_2 - U_{OUT}}{U_1} \quad (15)$$

Z něj již snadno vypočítáme hodnoty rezistorů tak, že zvolíme hodnotu $R_{28} = R_{25} = 10 \text{ k}\Omega$ a dle rovnice (16)

$$R_{29} = R_{26} = \frac{U_1 \cdot R_{28}}{U_2 - U_3} = \frac{1,2 \cdot 10000}{12 - 11,75} = 48 \text{ k}\Omega \quad (16)$$

vypočítáme zbývající rezistory. Hodnota napětí U_3 odpovídá stavu, kdy přes proudový senzor protéká maximální dosažitelný proud a na jeho výstupu je tak napětí $U_1 = 1,2 \text{ V}$.

Hodnota rezistoru R_{33} byla, vzhledem ke komplikovanému výpočtu, určena softwarovou simulací v programu PSpice tak, aby byl odečten offset 0,6 V.

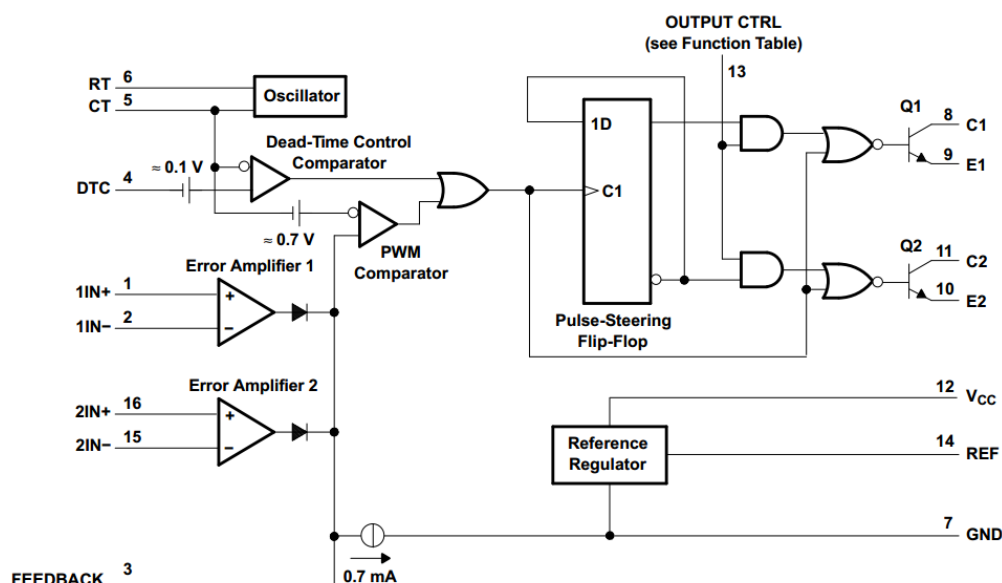
K výstupu operačního zesilovače je připojen napěťový dělič tvořený rezistorem R_{27} a konektorem JP₁, k němuž se připojí rezistor proměnné hodnoty. Díky němu si uživatel může zvolit velikost maximálního nabíjecího proudu. Kondenzátory C_{23} a C_{24} slouží pro stabilizaci vstupů zesilovače a k odstranění rušení.

2.2 Budicí část

Úkolem budicí části je tvorba šířkově modulovaného signálu (PWM) pro spínání výkonových tranzistorů ve výkonové části nabíječe.

2.2.1 Obvod TL494

Tento obvod je určen pro spínané zdroje několika topologií pracujících na pevně daném pracovním kmitočtu. Jeho vnitřní zapojení (obr. 4.) je optimalizováno tak, aby bylo potřeba minimálního počtu externích součástek.



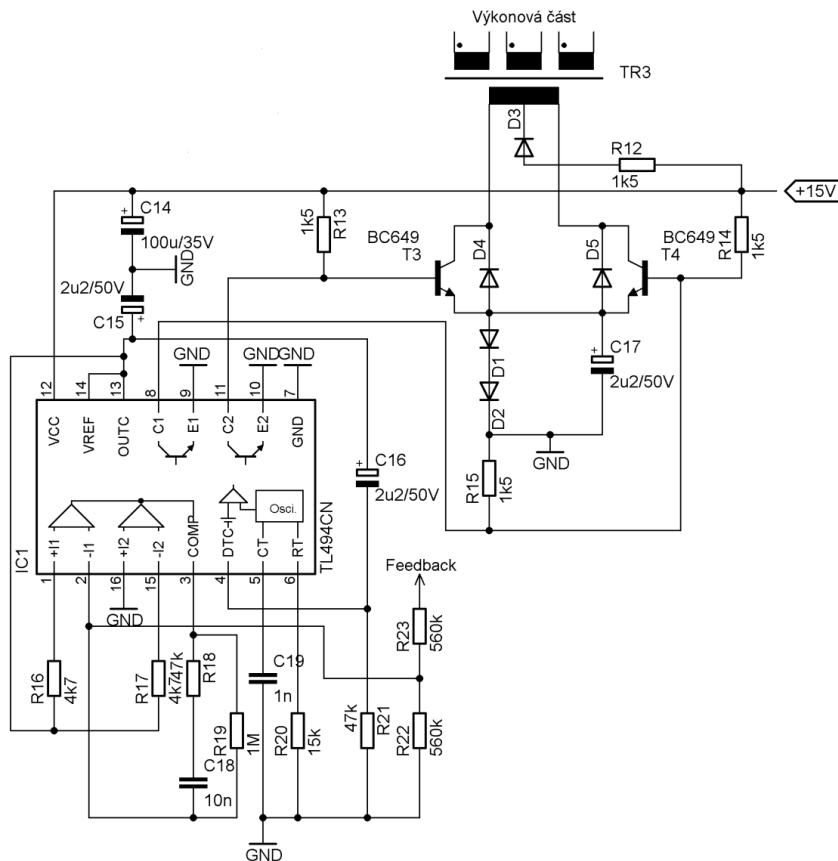
obr. 2.4: Vnitřní blokové zapojení obvodu TL494 (převzato z [5])

Obvod obsahuje dva chybové zesilovače, jimiž je možné měnit šířku pulzů PWM signálu. Dále integrovaný oscilátor, jehož kmitočet je nastavitelná pomocí externího rezistoru R_T a kondenzátoru C_T . Zapojení výstupních tranzistorů Q_1 a Q_2 umožňuje připojit k obvodu výkonové spínací tranzistory v zapojení společný emitor nebo společný kolektor. Vnitřní napěťová reference o napětí 5 V dosahující přesnosti $\pm 5\%$ je schopna napájet z výstupu REF externí obvody s maximálním odběrem proudu do 10 mA. Další důležitou součástí obvodu je Dead-Time komparátor. Ten zajišťuje zpoždění mezi rozepnutím tranzistoru Q_1 a sepnutím tranzistoru Q_2 a naopak. Délka tohoto zpoždění je závislá na přepínací strmosti výkonových tranzistorů, čili jejich době zotavení. V případě nevyužití nastavovacího pinu Deadtime control, je délka zpoždění dána vnitřním offsetem 0.1 V, který zajistí zpoždění o délce 5 % z celkového času jedné periody.

2.2.2 Schéma a výpočet součástek

Při návrhu zapojení budicí části bylo vycházeno z několika předpokladů. Nejprve byl zvolen pracovní kmitočet $f_{osc} = 40 \text{ kHz}$, který by svou velikostí měl zajistit přijatelné rozměry a výrobní cenu hlavního výkonového transformátoru a výstupní tlumivky ve výkonové části měniče při zadaném výstupním proudu. Z tohoto kmitočtu je možno zjistit hodnotu externích součástek. Jedná se o rezistor R_T ve schématu (obr. 2.5) označený jako R_{20} a kondenzátor C_T označený ve schématu (obr. 2.5.) jako C_{19} . Jejich hodnoty byly zjištěny z údajů v katalogu výrobce [5].

Další důležitý předpoklad je spjat s výkonovými tranzistory ve výkonové části měniče. K jejich rychlému spínání je zapotřebí značný proud tekoucí do jejich bází a bez přidavných obvodů by obvod TL494 nebyl schopen tento proud dodat. K jeho zesílení tedy slouží tranzistory T_3 , T_4 a budicí transformátor TR_3 , který zajistí potřebný převod napětí a proudů pro báze výkonových tranzistorů.



obr. 2.5: Schéma zapojení budicí části

Tranzistory T_3 a T_4 jsou hned po zapnutí nabíječe sepnuty díky bázovým proudům protékající přes rezistory R_{13} a R_{14} a zkratují tak vinutí budicího transformátoru. V tuto dobu je na pinu 4 obvodu TL494 referenční napětí a kondenzátor C_{16} je vybit. Ten se ale postupně nabíjí přes rezistor R_{21} , tím napětí na tomto pinu klesá a začínají se generovat spínací pulzy pro tranzistory T_3 a T_4 , tzv. soft-start. Když je některý z těchto tranzistorů zavřený, teče do příslušného vinutí budicího transformátoru budicí proud přes diodu D_5 a rezistor R_{12} . Diody D_6 a D_7 zajišťují ochranu před napěťovými špičkami, které se mohou indukovat při vypínání proudu tekoucího do transformátoru TR_3 . Křemíkové diody D_8 ,

D₉ zvyšují potenciál emitorů tranzistorů T₃ a T₄ vůči zemi přibližně o 1,4 V. Ten je filtrován kondenzátorem C₁₇ a díky němu jsou budicí tranzistory T₃ a T₄ dokonale rozepínány. Jak vyplývá z principu push-pull měniče (1.2.2), jsou tyto tranzistory buzeny obvodem TL494 protitaktně nebo také protifázově.

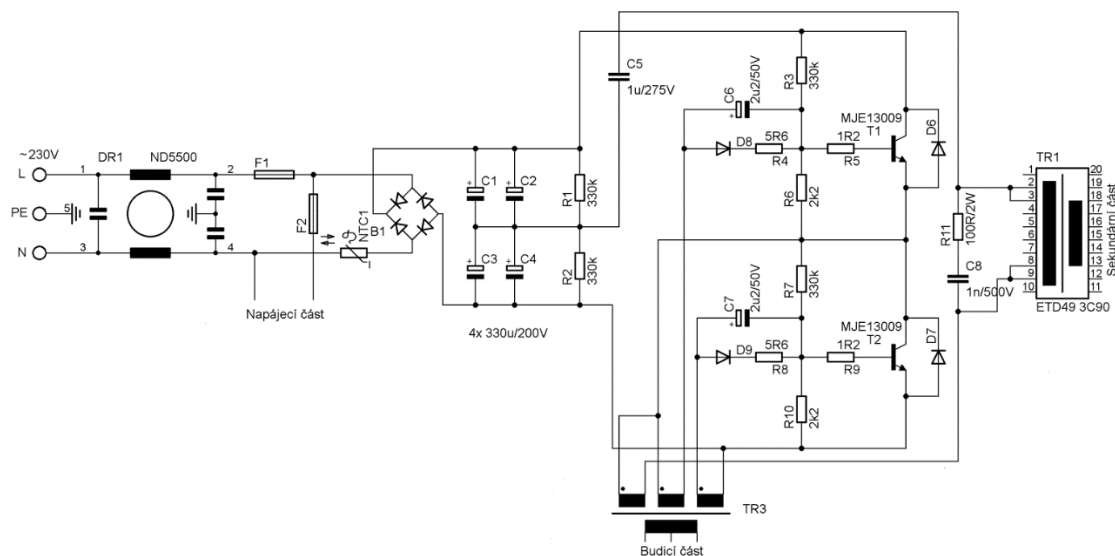
Pro řízení šířky pulzů postačí v našem případě pouze jeden chybový zesilovač. Proto je ten druhý vyřazen z činnosti tím, že neinvertující vstup (PIN16) je uzemněn a na invertující vstup je přivedeno referenční napětí přes rezistor R₁₇ z pinu 14. Na neinvertující vstup prvního chybového zesilovače (PIN1) je přivedeno referenční napětí U_{ref} přes rezistor R₁₆. Napětí U_{FEED} je přivedeno z řídicí části nabíječe přes napěťový dělič R₂₂, R₂₃ na invertující vstup (PIN2). Tato dvě napětí jsou mezi sebou porovnávána, čímž se reguluje šířka budicích impulsů. Z výstupu chybového zesilovače (PIN3) je pomocí rezistoru R₁₉ zavedena záporná zpětná vazba snižující jeho zesílení. Navíc je k tomuto rezistoru paralelně připojen RC článek, který pracuje jako horní propust, čili snižuje zesílení od vyšších kmitočtů. Takováto zpětná vazba velmi zvýší stabilitu a zabrání rozkmitání chybového zesilovače.

2.3 Výkonová a napájecí část

Úkolem výkonové části nabíječe je převod energie z rozvodné sítě na požadované hodnoty a průběhy proudů a napětí, které budou přivedeny k nabíjenému akumulátoru. Na většinu součástek v této části jsou kladeny vysoké požadavky na proudovou i napěťovou zatížitelnost. Napájecí část slouží jako zdroj napětí pro řídicí obvody nabíječe.

2.3.1 Schéma a popis funkce výkonové části

Zapojení obvodu, který napájí primární vinutí hlavního transformátoru TR₁, je na obr. 2.6. Síťové napětí 230 V je přivedeno na filtr, který tlumí elektromagnetické rušení vznikající při spínání výkonových tranzistorů T₁ a T₂. Síťové napětí je jištěno tavnou pojistkou F₁ a je přivedeno přes NTC (Negative Temperature Coefficient) termistor na usměrňovací Graetzův můstek B₁. Průběh usměrněného síťového napětí je vyhlazen kondenzátory C₁ až C₄, které zároveň svým zapojením vytvářejí umělý střed napájecího napětí. K nim připojené rezistory R₁ a R₂ pomáhají tento střed udržet právě v polovině napájecího napětí tím, že vyrovnávají svodové proudy.



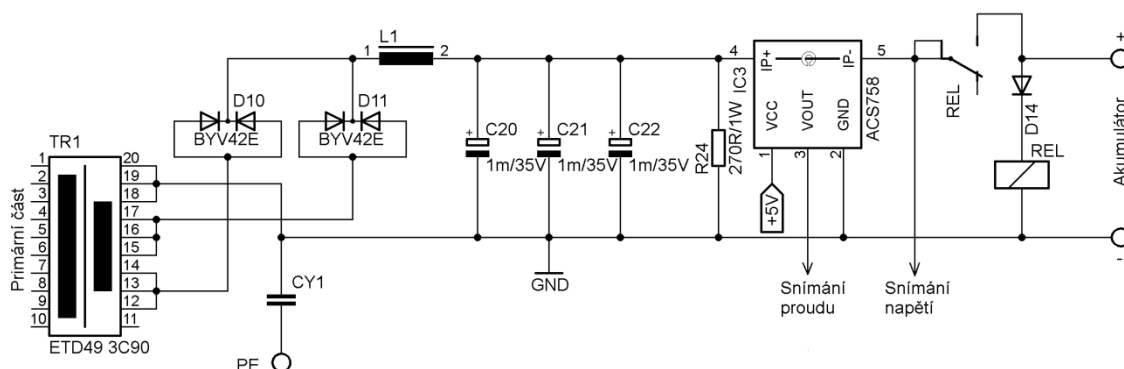
obr. 2.6: Zapojení obvodu napájecí primární vinutí hlavního transformátoru TR1

Sepne-li tranzistor T_1 , teče z kladných pólů vyhlazovacích kondenzátorů proud přes tento tranzistor na první vinutí budicího transformátoru TR3. Přes toto vinutí pokračuje do vinutí transformátoru TR1 a z něj přes kondenzátor C_5 , který odstraňuje případnou stejnosměrnou složku, na umělý střed napájecího napětí. Při sepnutí tranzistoru T_4 je směr proudu opačný, čili proud teče z umělého středu do záporných pólů vyhlazovacích kondenzátorů. Kondenzátor C_8 a rezistor R_{11} částečně ulehčují výkonovým tranzistorům rozpínání proudu tekoucího do vinutí transformátoru TR1 tím, že snižují překmit napětí, které se při rozepnutí na vinutí naindukuje. Přesto musí být použity tranzistory určené pro spínání indukčních zátěží, které mají vysoké průrazné napětí v závěrném směru. Navíc je ještě chrání diody D_3 a D_4 .

Budicí proud pro výkonové tranzistory T_1 a T_2 zajišťuje především budicí transformátor TR3. Protéká-li prvním vinutím (zleva) proud, vybudí se ve zbývajících dvou vinutích proud tekoucí do příslušné báze právě sepnutého tranzistoru. Jedná se vlastně o kladnou zpětnou vazbu, kdy si kolektorový proud vybudí vlastní bázevý proud úměrně menší, daný převodem tohoto transformátoru. Ten je převzat z většiny počítačových zdrojů pracujících na principu push-pull měniče a jeho hodnota činí 4,5:1. Tomu odpovídají dva závity na prvním vinutí a po devíti závitech na zbývajících dvou vinutích. Impulzy přicházející z budicí části do transformátoru TR1 slouží tedy pouze k pootevření výkonových tranzistorů. Bázevý proud je sice poněkud velký, ale tím dosáhneme menšího saturačního napětí, které zajistí menší výkonové ztráty v sepnutém stavu tranzistorů. Při rozepínání tranzistorů se navíc ve vinutích TR3 indukuje záporný bázevý proud, který pomáhá rekombinaci nábojů v přechodu a tím poklesne doba potřebná pro jeho uzavření. Diody D_1 , D_2 společně s rezistory R_4 , R_6 , R_8 , R_{10} a kondenzátory C_6 , C_7 zvyšují záporné napětí na těchto bázích, snižují spínací i vypínací časy tranzistorů a navíc zvyšují i jejich odolnost proti vysokému napětí.

Rezistory R_3 a R_7 slouží při rozběhu měniče. Objeví-li se na tranzistorech po zapnutí napájecí napětí, tyto odpory zajistí, že díky nestejným parametrům výkonových tranzistorů a kladné zpětné vazbě vytvořené transformátorem TR3, se měnič samovolně rozkmitá. To způsobí, že se na sekundární straně transformátoru TR1 (obr. 2.7) naindukuje napětí, které je po usměrnění snímáno a vyhodnocováno řídicí částí. Ta díky

tomu začne řídit budicí část, která spínání výkonových tranzistorů stabilizuje a uzpůsobí dle aktuálních potřeb.

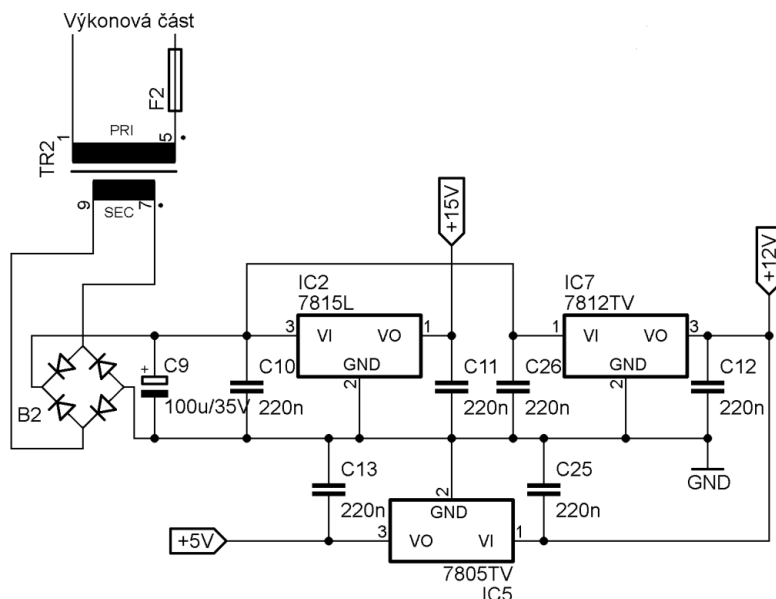


obr. 2.7: Zapojení obvodu na sekundární straně hlavního transformátoru TR₁

Sekundární část transformátoru TR₁ tvoří dvojité vinutí. Proud z tohoto vinutí je usměrněn dvojími diodami D₁₀, D₁₁ a teče do akumulačních prvků tvořených cívkou L₁ a kondenzátory C₂₀ až C₂₂. Ty vyhladí průběhy výstupního napětí a proudu. K tomuto LC článku je paralelně připojen rezistor R₂₄, který slouží jako předzátěž při odlehčení zdroje. Zpětná vazba by totiž při náhlém odpojení zátěže nestihla dostatečně rychle zareagovat a výstupní napětí by neúměrně vzrostlo. Dalším prvkem výkonového obvodu je senzor proudu IC₅. Ten funguje podobně jako odporový bočník. Podle velikosti proudu, který protéká mezi jeho piny 4 a 5, se na pinu 3 objeví napětí o velikosti úměrné tomuto proudu. Relé umístěné před výstupními svorkami slouží jako ochrana zdroje i akumulátoru před přepólováním. Odrušovací kondenzátor CY1 zkratuje rušivé kmitočty proti zemi sítě.

2.3.2 Schéma a popis funkce napájecí části

K napájení všech řídicích obvodů a senzoru slouží napájecí část nabíječe. Ta je jištěna tavnou pojistkou F₂ a tvoří ji v první řadě síťový transformátor TR₂ s výstupním napětím 15 V na jeho sekundární straně. Jeho průběh je usměrněn můstkem B₂ a vyhlazen kondenzátorem C₉. Následují lineární stabilizátory IC₁ až IC₃. Jejich použití je, co se týče účinnosti celého nabíječe, vyhovující, protože proudový odběr z jejich výstupů je malý a nezpůsobí tak významnější tepelné ztráty. Přesto stabilizátory IC₂ a IC₃ jsou zapojeny do kaskády, aby se tepelná ztráta lépe rozložila. Kondenzátory C₁₀ až C₁₃ zajišťují spolehlivou a stabilní funkci stabilizátorů a tlumí případné nežádoucí rušení.



obr. 2.8: Schéma napájecí části

2.3.3 Výpočet transformátorů a výstupního filtru

Nejprve si rozeberme výpočet **hlavního transformátoru TR1**. Feritové jádro bylo zvoleno typu ETD49 z materiálu 3C90 pro své vlastnosti odpovídající našim požadavkům. Použité rovnice jsou převzaty z [6].

Nejprve určíme počet závitů primárního vinutí N_1 pomocí (17)

$$N_1 = \frac{U_1 \cdot s_{max}}{B_{max} \cdot S \cdot f} = \frac{160 \cdot 0,25}{0,18 \cdot 211 \cdot 10^{-6} \cdot 40000} = 26 \text{ závitů}, \quad (17)$$

kde U_1 je špičková hodnota napájecího napětí a s_{max} je maximální střída. Doporučené sycení pro použitý materiál udává výrobce [7] o hodnotě $B_{max} = 180 \text{ mT}$. Efektivní průřez jádra S jsme zjistili z katalogových údajů [7] pro zvolené jádro a jeho hodnota činí 211 mm^2 . Pracovní kmitočet byl při návrhu zvolen na $f = 40 \text{ kHz}$.

Sekundární vinutí je nutno počítat na napětí o 50 % větší než výstupní, aby byla zajištěna spolehlivá funkce zpětné vazby. Počet závitů se tedy vypočítá dle (18)

$$N_2 = \frac{1,5 \cdot U_{výst} \cdot N_1}{U_1} = \frac{1,5 \cdot 17 \cdot 26}{160} = 4 \text{ závity}. \quad (18)$$

Výstupní napětí $U_{výst} = 17 \text{ V}$ je zvoleno o 2 V vyšší než potřebné výstupní napětí, aby byly respektovány ztráty na usměrňovačích.

Celková hodnota indukčnosti primárního vinutí L_P se získá z (19)

$$L_P = A_L \cdot N_1^2 = 4200 \cdot 10^{-9} \cdot 26^2 = 2,84 \text{ mH}, \quad (19)$$

kde A_L značí magnetickou vodivost jádra [nH/záv^2] opět odečtenou z katalogových údajů výrobce [7].

Následuje výpočet magnetizačního proudu I_P transformátoru podle rovnice (20)

$$I_P = \frac{N_1 \cdot B_{max} \cdot S}{L_P} = \frac{26 \cdot 0,18 \cdot 211 \cdot 10^{-6}}{2,84 \cdot 10^{-3}} = 0,347 A \quad (20)$$

Další nezbytnou veličinou pro návrh transformátoru je efektivní proud I_{1ef} protékající primárním vinutím. Jeho velikost se určí dle (21)

$$\begin{aligned} I_{1ef} &= \sqrt{\left(I_S \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \sqrt{s_{max}}\right)^2 + \left(\frac{I_P}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2 \cdot s_{max}}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(20 \cdot \frac{4}{26} \cdot \sqrt{0,25}\right)^2 + \left(\frac{0,347}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2 \cdot 0,25}\right)^2} = 1,55 A, \end{aligned} \quad (21)$$

kde proud $I_S = 20 A$ a značí výstupní proud tekoucí sekundárním vinutím.

Nyní jsou na řadě výpočty průřezů vodičů, pomocí kterých jsou navinuta jednotlivá vinutí. Průřez vodiče primárního vinutí určíme ze vztahu (22)

$$S_{prim} = \frac{I_{1ef}}{J} = \frac{1,55}{4,5} = 0,34 \text{ mm}^2, \quad (22)$$

ve kterém za $J = 4,5 A/\text{mm}^2$ dosazujeme zvolenou proudovou hustotu. Nalezení velikosti průřezu vodiče sekundárního vinutí S_{sek} popisuje vztah (23)

$$S_{sek} = \frac{I_S}{J} = \frac{20}{4,5} = 4,44 \text{ mm}^2. \quad (23)$$

Díky tomu, že navrhovaný transformátor bude pracovat s kmitočtem $f = 40 \text{ kHz}$, projeví se na jeho vodičích tzv. skin efekt. Ten způsobí, že proud teče vodičem jen po jeho obvodu s určitou hloubkou vniku δ , která se spočítá pomocí rovnice (24)

$$\delta = \frac{75}{\sqrt{f}} = \frac{75}{\sqrt{40000}} = 0,375 \text{ mm}. \quad (24)$$

Z tohoto údaje nyní vypočítáme maximální průměr vodiče d_{max} podle (25)

$$d_{max} = 2 \cdot \delta = 2 \cdot 0,375 = 0,75 \text{ mm} \quad (25)$$

který můžeme použít, aby nevznikal skin efekt a my tak pro přenos proudu využili celý průřez vodiče. Vodič s tímto průměrem je sériově vyráběn. Průřez tohoto vodiče zjistíme ze vztahu (26)

$$S_{max} = \frac{\pi \cdot 0,75^2}{4} = 0,44 \text{ mm}^2. \quad (26)$$

Z těchto vodičů je nutné vytvořit svazek, který svým celkovým průřezem dokáže při zvolené proudové hustotě přenést požadovaný proud. Počet těchto vodičů v jednotlivých svazcích vypočítáme podle rovnice (27)

$$n_{prim} = \frac{S_{prim}}{S_{max}} = \frac{0,34}{0,44} \cong 1 \quad (27)$$

pro primární vinutí a pomocí (28)

$$n_{s2} = \frac{S_{s2}}{S_{max}} = \frac{4,44}{0,44} \cong 10 \quad (28)$$

pro sekundární vinutí S₂.

Při navíjení hlavního transformátoru TR₁ nezáleží na pořadí ani smyslu sekundárních vinutí. Pro lepší vazbu je vhodné primární vinutí rozdělit. První polovina závitů představuje první vinutí a druhá polovina poslední vinutí. Jejich smysl musí být totožný.

Pro **budicí transformátor TR₃** bylo zvoleno jádro E16 z materiálu 3F3. Jak bylo řečeno v kapitole 2.3.1, je na primární straně transformátoru první vinutí tvořeno dvěma závitů a další dvě vinutí devíti závitů. První vinutí musí být navinuto stejným vodičovým svazkem jako primární vinutí hlavního transformátoru TR₂, čili jedním drátem o průměru 0,75 mm. Dalšími dvěma vinutími bude protékat proud okolo $I_{ef} = 330$ mA, čili dosazením do rovnice (22) a následným odvozením z rovnice pro výpočet obsahu kruhu a dosazením vypočteného průřezu S_B dostáváme (29)

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S_B}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,073}{\pi}} = 0,3 \text{ mm} \quad (29)$$

Tato dvě vinutí tedy budou navinuta jedním vodičem o průměru 0,3 mm. Zbývající dvě vinutí na straně budicí části se určí odhadem, protože slouží pouze pro prvotní pulz, který pootevře příslušný tranzistor. Volíme tedy pro každé vinutí 35 závitů vodičem o průměru 0,1 mm.

Při navíjení transformátoru je nutno dbát na pořadí i smysl jednotlivých vinutí. Nejprve se navinou dvě vinutí (po 9 závitech) připojená k bázím výkonových tranzistorů T₁, T₂, poté dvě vinutí na straně budicí části (po 35 závitech) a nakonec proudové budicí vinutí (2 závitů).

Nyní vypočítáme minimální hodnoty součástek **výstupního filtru**. Výpočet je ale jen velmi orientační a slouží spíše jako počáteční odrazový bod pro následné experimentování. Velikost kapacity $C_{20} + C_{21} + C_{22} = 3$ mF byla zvolena z poměru kapacita/proud jaký je možno nalézt ve spínaných počítačových zdrojích obdobné konstrukce. Kondenzátory musí být typu Low-ESR, čili s nízkým sériovým odporem. Nyní přejdeme k výpočtu výstupní tlumivky L_1 , která snižuje rozkmit výstupního proudu. Její indukčnost se vypočítá podle rovnice (30) převzaté z [8]

$$L_1 = \frac{\frac{U_1}{N_1} - U_{OUT} \cdot 1,04}{\Delta I_L} \cdot \frac{s_{max}}{f} = \frac{\frac{160}{26} - 15 \cdot 1,04}{1} \cdot \frac{0,5}{80000} = 46,7 \mu H, \quad (30)$$

kde $U_{OUT} = 15 \text{ V}$ odpovídá nejvyšší hodnotě svorkového napětí a $\Delta I_L = 1 \text{ A}$ značí maximální přípustný rozkmit výstupního proudu. Maximální střída $s_{max} = 0,5$, protože každý z výkonových tranzistorů T_1 a T_2 spíná s maximální střídou $0,25$. Po usměrnění diodami na sekundární straně transformátoru TR_1 se záporná půlvlna překlápí do kladné části, čímž se zvýší kmitočet f na 80 kHz . Praktické poznatky z návrhu tlumivky jsou uvedeny v kapitole 4.2.

3 KONSTRUKCE

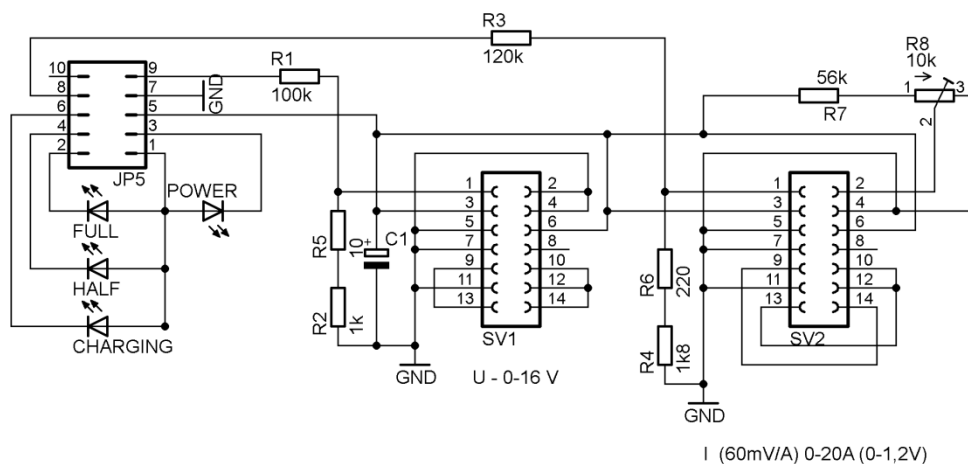
Tato kapitola se zabývá návrhem plošných spojů a mechanickou konstrukcí popsaného nabíječe. Jelikož nabíječ pracuje se síťovým napětím, jsou na konstrukci kladeny určité nároky na bezpečnost a zpracování, které musí být respektovány.

3.1 Plošné spoje

Pro výrobu desek plošných spojů byl zvolen standartní substrát s jednostranným pokrytím mědi tloušťky 35 μm a dielektrikem typu Cuprextit. Návrh probíhal pomocí specializovaného softwaru EAGLE v. 6.1.0 od firmy CadSoft. Kvůli požadavku na snadné ovládání a ergonomii práce se nabíječ skládá ze dvou desek plošných spojů.

Všechny části (kontrolní, budicí, výkonová, napájecí) jsou umístěny na hlavní desce plošných spojů (viz. Příloha B). Zde byl kladen důraz na dostatečnou šířku spojů pro přenášené proudy a také na bezpečnostní izolační mezery mezi částmi s vysokým a nízkým pracovním napětím. Vzhledem k rozměrům byly použity diskrétní součástky.

Druhá deska plošných spojů (viz. Příloha B) slouží k signalizaci probíhající nabíjecí fáze a k zobrazení svorkového napětí a proudu tekoucího do akumulátoru. Pro tento účel byly použity dva panelové digitální multimetry typu DPM961 společnosti FALCON. Díky poměrně složitému propojení všech nastavovacích pinů, jsou tyto spoje provedeny cestami na plošném spoji. Multimetry jsou s deskou propojeny konektory SV₁ pro měřič napětí a SV₂ pro měřič proudu, jak je možné vidět ze schématu na obr. 3.1.



obr. 3.1: Schéma zapojení signalizační desky

Z něj jsou také patrné děliče napětí tvořené rezistory R₁ až R₆, upravující měřená napětí na přípustný rozsah vstupních měřicích pinů použitých multimetrů. Děličem napětí tvořeným rezistorem R₇ a trimrem R₈ se přesně nastaví na pinu 2 napětí 0,6 V. To zajistí, že bude odečten napěťový offset proudového snímače a na displeji multimetru se zobrazí správná hodnota aktuálně odebíraného proudu akumulátorem. Kondenzátor C₁ pouze blokuje rušení, které by se mohlo šířit po napájení. Konektor JP₅ zprostředkovává propojení signalizační desky s deskou hlavní. Zapojení jednotlivých vývodů popisuje tabulka tab. 3.1.

tab. 3.1: Zapojení vývodů konektoru JP5 k vývodům konektorů na hlavní desce

Pin JP5	Konektor	Pin
1	JP4	1
2	JP1	1
3	JP1	4
4	JP1	3
5	JP4	2
6	JP1	2
7	JP3	2
8	JP4	3
9	JP3	1
10	-	-

3.2 Skříňka

Všechny části nabíječe jsou uzavřeny v plechové skřínce obr. 3.2, která slouží jako mechanická opora všech komponentů. Také kryje části pracující se síťovým napětím, aby nedošlo k nebezpečnému dotyku uživatele s těmito částmi.

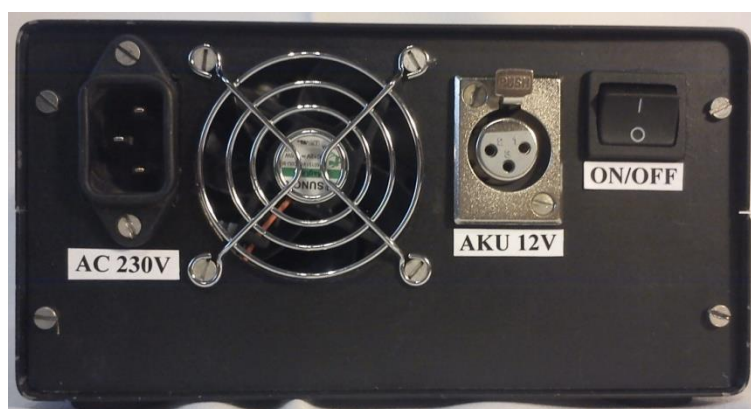


obr. 3.2: Skříňka a umístění všech částí nabíječe (pohled shora)

Na zadním panelu obr. 3.3 je umístěn konektor pro připojení napájecího kabelu, ventilátor, konektor pro připojení přívodních kabelů k akumulátoru a hlavní síťový vypínač. Přední panel obr.3.4. obsahuje ovládací a signalizační prvky. Jsou zde LED diody signalizující nabíjecí fázi, měřič napětí, měřič proudu a otočný 6ti-polohový přepínač, díky kterému může uživatel zvolit maximální nabíjecí proud. Hodnoty rezistorů připojených k jeho vývodům udává tabulka tab. 3.2.



obr. 3.3: Přední panel nabíječe



obr. 3.4: Zadní panel nabíječe

tab. 3.2: Hodnoty rezistorů voliče maximálních nabíjecích proudů

Nabíjecí proud [A]	Hodnota rezistoru [Ω]
1	100000
2	5600
5	1800
10	820
15	680
20	470

3.3 Chlazení

Navržený nabíječ při svém provozu část dodané energie přemění na teplo. Toto odpadní teplo vzniká především na výstupní tlumivce L_1 , výkonových spínacích tranzistorech T_1, T_2 a také na usměrňovacích diodách D_{10}, D_{11} . Polovodičové prvky jsou proto opatřeny hliníkovými chladiči, aby mohly své odpadní teplo lépe vyzářit do okolí. Aby se toto teplo nehromadilo ve skříňce, je na jejím zadním panelu umístěn ventilátor a ve předu na spodní straně skříňky je řada otvorů. Tím vznikne proud vzduchu, který toto teplo odvádí ven ze skříňky. Ventilátor je napájen z 12 V větve napájecí části nabíječe.

4 MĚŘENÍ A DŮLEŽITÉ PRŮBĚHY

Tato kapitola shrnuje dosažené výsledky a naměřené průběhy napětí i proudů provedené na prvním prototypu navrženého nabíječe.

4.1 Účinnost

Jedním z velmi důležitých parametrů je bezesporu účinnost celého zařízení. Její velikost přehledně popisuje následující tabulka tab. 4.1. Akumulátor byl nahrazen odporovou zátěží a voličem maximálního nabíjecího proudu byla nastavena nejvyšší hodnota (20 A). Nabíječ proto na výstupních svorkách udržoval napětí 14,6 V po celou dobu měření.

tab. 4.1: Dosažená účinnost

Výstupní proud [A]	Výstupní výkon [W]	Příkon [W]	Účinnost [%]
2	29	48	60
5	73	106	69
10	146	206	71
15	219	300	73
20	292	380	77

Z naměřených údajů je patrné, že dosažená účinnost je vzhledem k použitému spínanému měniči poměrně nízká. Množství tepla, které produkuje výstupní tlumivka L_1 a výkonové tranzistory T_1, T_2 , je větší, než bylo předpokládáno. Proto bude nutné experimentovat s různými typy jader tlumivky, s hodnotou její indukčnosti a výkonové bipolární tranzistory případně nahradit unipolárními typy.

4.2 Průběhy napětí a proudů

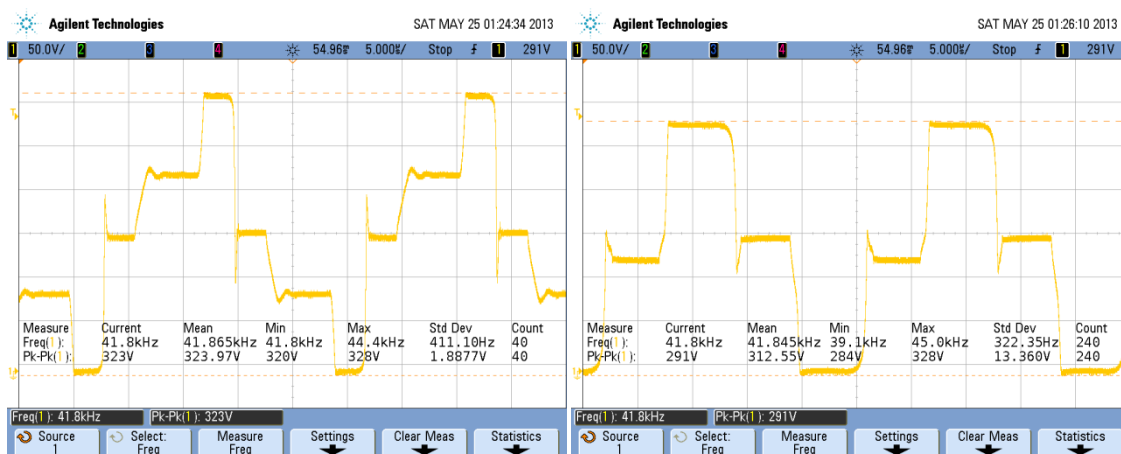
Zásadním průběhem celého zařízení je průběh proudu na výstupní tlumivce L_1 . Na obr. 4.2 je tento průběh znázorněn pro tlumivku navinutou čtyřmi závity na toroidním železoprachovém jádře, s indukčností 5 uH (měřeno při 10 kHz sinusového průběhu).

Z průběhů je patrné, že tlumivka při nízkých odebíraných proudech I_{OUT} pracuje v režimu přerušovaných proudů. Při vyšších proudech I_{OUT} přejde do režimu proudů spojitých. Rozkmit tohoto proudu je ale značný a velmi tak zatěžuje výkonové tranzistory T_1, T_2 , usměrňovací diody D_{10}, D_{11} i hlavní transformátor TR_1 . Výstupní napětí je ale velmi stabilní s malým zvlněním. To je dáno tím, že tlumivka vykazuje při kmitočtu 80 kHz nízkou impedanci. Tím je i vnitřní odpor spínaného měniče nízký a z pohledu zátěže se jeví jako "tvrdý" zdroj. Proudové namáhání spínacích prvků a hlavního transformátoru na druhou stranu způsobuje vyšší ztráty a zhoršuje celkovou účinnost nabíječe. Při zvýšení indukčnosti použité tlumivky L_1 klesne rozkmit proudu, ale zvýší se její impedance, čímž se zvýší vnitřní odpor měniče a výstupní napětí bude zvlněné nebo dokonce poklesne. Zpětná vazba totiž již není schopna změnou šířky budících impulsů dodat potřebné množství energie. Účinnost celého nabíječe na druhou stranu vzroste, díky menším ztrátám. Bude tedy potřeba s tlumivkou ještě dále experimentovat.



obr. 4.1: Průběhy proudu na tlumivce L_1 (vlevo $I_{OUT} = 8\text{ A}$, vpravo $I_{OUT} = 16\text{ A}$)

Dalším důležitým průběhem je průběh napětí na výkonových spínacích tranzistorech T_1 a T_2 . Na obr. 4.2 je znázorněn průběh napětí mezi na elektrodách kolektor - emitor tranzistoru T_1 .



obr. 4.2: Průběhy napětí na C-E tranzistoru T_1 (vlevo $I_{OUT} = 5\text{ A}$, vpravo $I_{OUT} = 16\text{ A}$)

Je zde prakticky vidět jakým způsobem je usměrněné síťové napětí spínáno na primární vinutí hlavního transformátoru TR_1 , který byl popsán v kapitole 2.3.1. Zákmity v průbězích jsou způsobeny rozptylovými indukčnostmi hlavního transformátoru.

5 ZÁVĚR

V této práci byly rozebrány základní nabíjecí metody olověných akumulátorů a na jejich základě bylo navrženo zapojení respektující jak tyto metody, tak i požadavky dané zadáním. Byl vytvořen jeden prototyp, na kterém se provedlo měření a odladění parametrů. Bylo zjištěno, že je návrh správný a zařízení vykazuje správnou funkci. Nabíjené akumulátory jsou díky tomuto nabíječi nabíjeny šetrně, ale přitom dostatečně rychle a efektivně.

V návrhu zbývá jen odladit výstupní filtr a to především tlumivku L_1 , případně upravit výkonové spínací prvky, aby se zvýšila účinnost, ale přitom se nezvětšilo zvlnění výstupního napětí. Přední panel by měl být doplněn o popisky všech ovládacích a signalizačních prvků.

Díky získaným znalostem při tvorbě této práce by dalším krokem ve vývoji výkonných nabíječů mohl být přechod z push-pull měniče na zapojení můstkové. Díky tomu by několikanásobně vzrostl možný dodávaný výkon. Na trhu jsou již obvody zajišťující většinu potřebných řídicích a budících signálů, které zajistí vysokou účinnost a malé rozměry celého zařízení.

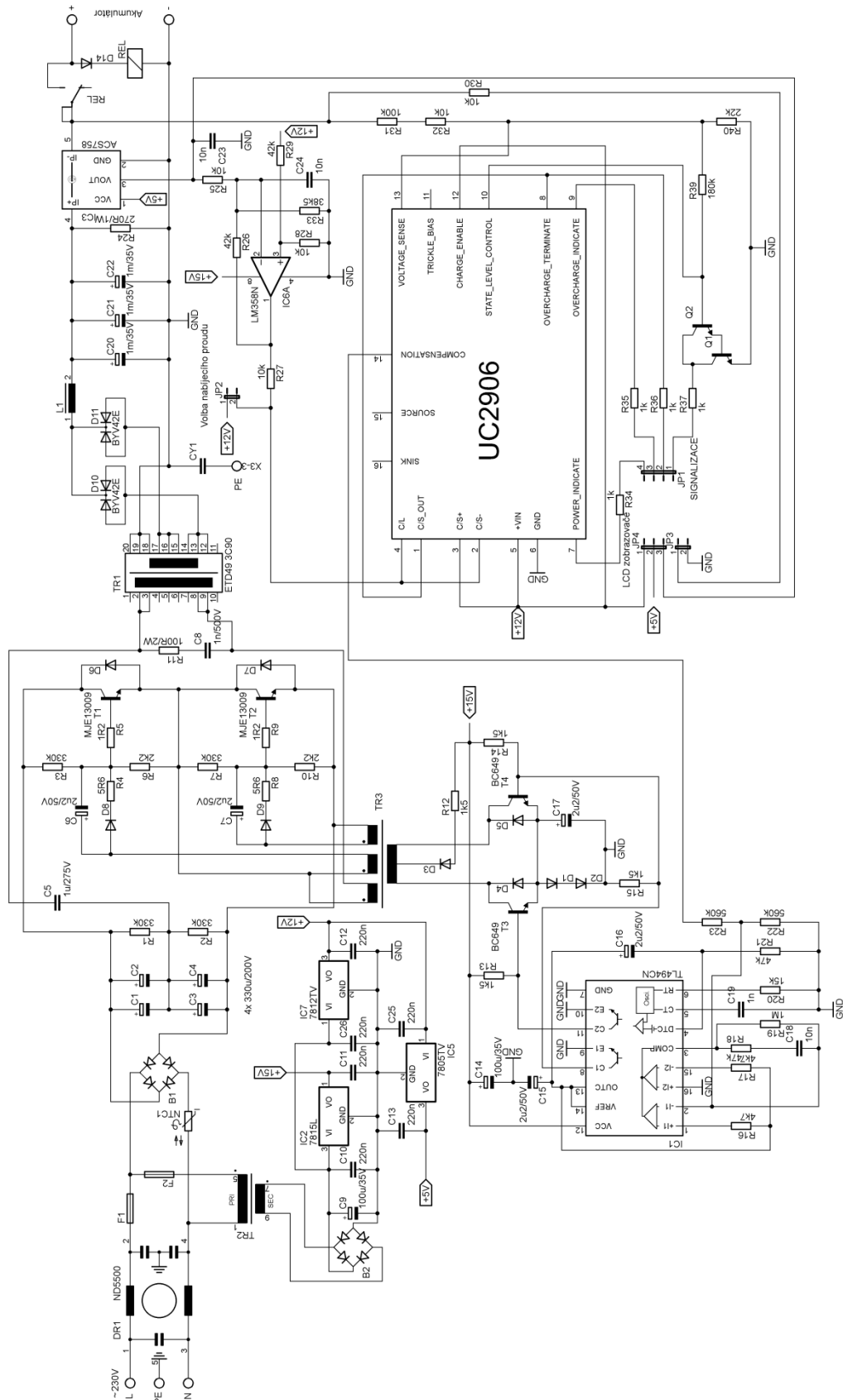
POUŽITÁ LITERATURA

- [1] DOC. ING. HAMMERBAUER PH.D., J. Olověné akumulátory. [online]. [cit.2012-11-10]. Dostupné z: <http://www.renerga.cz/content/file/AKUMUL%C3%81TORY%20TEORIE%202.PDF>
- [2] DOC. ING. NOVOTNÝ, CSC, Vlastislav, Doc.Ing. Pavel VOREL a Doc.Dr.Ing.Miroslav PATOČKA. *Napájení elektronických zařízení: Přednášky*. Brno: FEI VUT v Brně, 1999.
- [3] Texas Instruments, *Datasheet UC3906* [online], Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265, 2011. Dostupné z: <http://pdfdata.datasheetsite.com/web/47384/UC3906.pdf>
- [4] SLÁNSKÝ, Michal. Inteligentní nabíječka olověných akumulátorů. [online]. 2006 [cit. 2012-11-10]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/konstrukce/inteligentni-nabijacka-pb-akumulatoru.html>
- [5] Texas Instruments, *Datasheet TL494* [online], Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265, 2005. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf>
- [6] KADLEC, J. *Nabíječka autobaterií se spínaným zdrojem*. Bakalářská práce.Brno: FEKT VUT v Brně, 2008.
- [7] Ferroxcube, *Datasheet ETD49* [online], Polná, Czech Republic 58813, 2008. Dostupné z: <http://www.ferroxcube.com/prod/assets/etd49.pdf>
- [8] FAKTOR, Z. *Tlumivky a transformátory pro spínané napájecí zdroje*. 1.st ed. Praha: BEN-Technická literatura, 2002. p.184-192. ISBN 80-86056-91-0.
- [9] HALMAZŇA, Jiří. Spínaný síťový zdroj 500W. *Amatérské rádio*. 2008, č. 11, s.25-30.
- [10] MARCONI. Čezeta 175 Sport typ 487: Dokumenty. [online]. 2008 [cit. 2012-11-10]. Dostupné z: <http://www.cezeta487.ic.cz/Documents/akumulatory.pdf>

SEZNAM PŘÍLOH

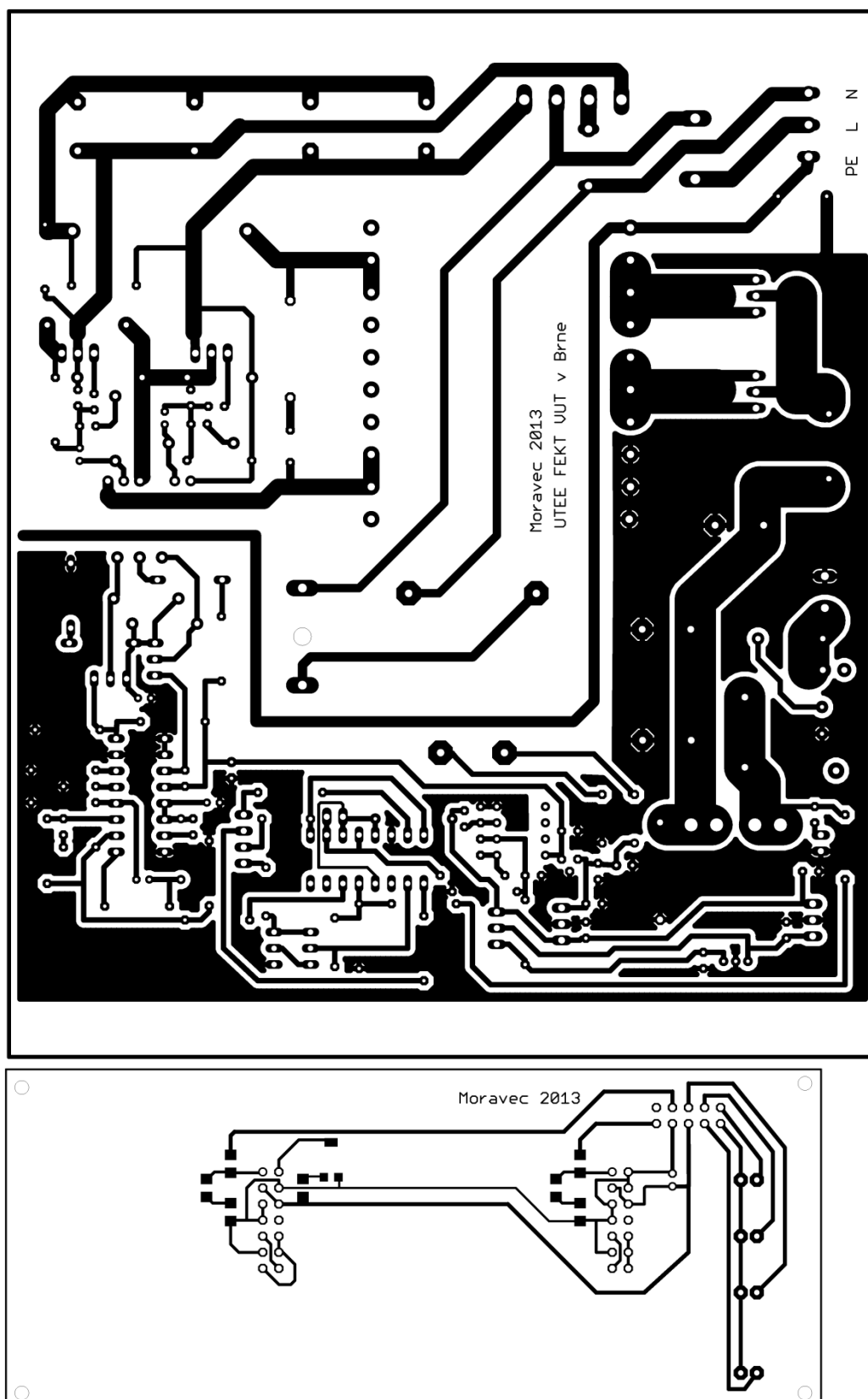
A	Celkové schéma zapojení.....	30
B	Desky plošných spojů.....	31
C	Seznam použitých součástek.....	32

A CELKOVÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ



B DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

Hlavní deska nabíječe a deska signalizace:



C SEZNAM POUŽITÝCH SOUČÁSTEK

Název	Hodnota	Název	Hodnota
R1,R2,R3,R7	330k	D1,D2,D3	1N4148
R4,R8	5R6	D4,D5,D6,D7,	1N4004
R5,R9	1R2	D8,D9,D14	1N4004
R6,R10	2k2	D10,D11	BYV42
R11	100R/2W	B1	KBU8M
R12,R13,R14,R15	1k5	B2	B380C1000DIL
R16,R17	4k7	Q1,Q2	BC546
R18,R21	47k	T1,T2	MJE13009
R19	1M	T3,T4	BC649
R20	15k	IC1	TL494
R22,R23	560k	IC2	7815
R24	270R/1W	IC3	ACS758
R25,R27,R28,R30,R32	10k	IC4	UC2906
R26,R29	42k	IC5	7815
R31	100k	IC6	LM358
R33	39k	IC7	7812
R34,R35,R36,R37	1k	L1	Viz. kap. 2.3.3
R39	180k	TR1	Viz. kap. 2.3.3
R40	22k	TR2	Sek: 15V; 4,5VA
C1,C2,C3,C4	330μF/200V	TR3	Viz. kap. 2.3.3
C5	1μF/275V X2	NTC1	4R7/5A
C6,C7,C15,C16,C17	2,2μF /50V	JP1,JP2,JP3,JP4	Jumper
C8,C19	1nF/500V	F1	T2A
C9,C14	100μF/35V	F2	F200mA
C10,C11,C12,C13,C25,C26	220nF	REL	4120
C18,C23,C24	10nF		
C20,C21,C22	1mF/35V low ESR		
CY1	472M/250V Y2		

Deska signalizace:

Název	Hodnota	Název	Hodnota
R1	100k	R8	10k
R2	1k	POWER,CHARGING	LED 5mm
R3	120k	FULL, HALF	LED 5mm
R4	1k8	JP5	Jumper 10 pinů
R5	10R	C1	1μF/16V
R6	220R	SV1,SV2	Dutinková lišta 10 pinů
R7	56k		